



Уральский
федеральный
университет

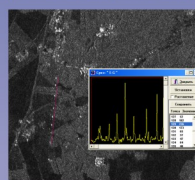
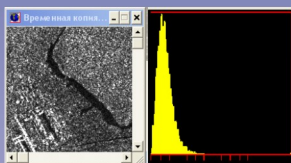
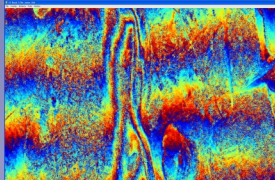
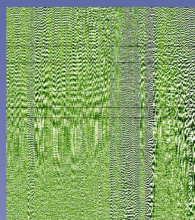
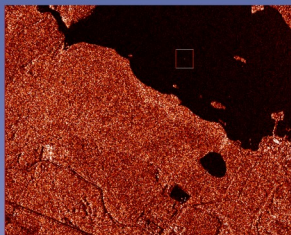
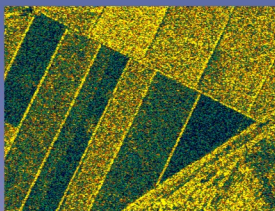
имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Институт радиоэлектроники
и информационных
технологий

В. Г. КОБЕРНИЧЕНКО
О. Ю. ИВАНОВ
А. В. СОСНОВСКИЙ

ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Лабораторный практикум



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б. Н. ЕЛЫЦИНА

В. Г. Коберниченко, О. Ю. Иванов,
А. В. Сосновский

ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Лабораторный практикум

Рекомендовано методическим советом УрФУ
в качестве учебно-методического пособия для студентов, обучающихся
по программам бакалавриата и магистратуры
по направлению подготовки 210400 «Радиотехника»
и по специальности 210601 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2013

УДК 621.396.44(07)

ББК 32.95я7

К 552

Под общей редакцией
кандидата технических наук, доцента В. Г. Коберниченко

Рецензенты:
кафедра информационных технологий и защиты информации
Уральского государственного университета путей сообщений
(заведующий кафедрой доктор физико-математических наук Ю. И. Ялышев);
А. А. Старостин, кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
(Институт теплофизики УрО РАН)

Коберниченко, В. Г.

К 522 Обработка радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли : лаборатор. практикум / В. Г. Коберниченко, О. Ю. Иванов, А. В. Сосновский ; [под общ. ред. В. Г. Коберниченко] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. — 64 с.

ISBN 978-5-7996-0949-8

Приведены краткие сведения из теории и рекомендации по выполнению комплекса лабораторных работ, посвященных изучению основных этапов обработки данных радиолокационных систем космического наблюдения: формированию радиолокационного изображения, геометрической и радиометрической коррекции, фильтрации спекл-шума, построению цифровой модели местности. Основной акцент сделан на практическом применении современных специализированных программных комплексов RADARSAT Tools, ERDAS IMAGINE 9.1, SARscape 4.3 ENVI 4.8, Photomod RADAR, Scanex Image Processor.

Для студентов и магистрантов, обучающихся по направлению подготовки «Радиотехника» и специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы». Может быть полезным для студентов, изучающих информационные системы и технологии, прикладную информатику, картографию и геоинформатику.

УДК 621.396.44(07)

ББК 32.95я7

ISBN 978-5-7996-0949-8

© Уральский федеральный университет, 2013
© Коберниченко В. Г., Иванов О. Ю.,
Сосновский А. В., 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие авторов	4
ЭТАПЫ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ. ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ	6
Прием данных с природно-ресурсных спутников на персональные станции	6
Формирование космических радиолокационных изображений.....	11
Радиометрическая и геометрическая коррекции	16
Радиолокатор с синтезированной апертурой космического аппарата RADARSAT-1	17
Фильтрация спекл-шума	21
Применение интерферометрической радиолокационной съемки для построения цифровых моделей рельефа	25
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....	34
1. Прием данных ДЗЗ на наземной станции «УниСкан-24»	34
2. Синтез фрагмента радиолокационного изображения по данным PCA RADARSAT-1	37
3. Фильтрация спекл-шума на изображениях PCA.....	43
4. Построение цифровой модели рельефа по данным космической радиолокационной интерферометрической съемки	56
5. Сравнение эффективности алгоритмов фильтрации фазового шума при интерферометрической обработке радиолокационных данных.....	60
Библиографические ссылки	63

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРОВ

Изучение принципов построения и методов обработки информации в современных радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга входит в программы подготовки бакалавров по направлению 210400 «Радиотехника» (профиль «Радиоэлектронные системы»), специалистов по специальности 210601 «Радиоэлектронные системы и комплексы», а также магистров по программе «Обработка сигналов и изображений в радиоэлектронных системах». В этих программах предусмотрено изучение таких дисциплин, как «Основы дистанционного зондирования», «Радиоэлектронные системы дистанционного зондирования Земли», «Обработка данных дистанционного зондирования Земли», «Современные программно-инструментальные средства обработки сигналов и изображений».

Грамотный специалист, владеющий технологиями дистанционного зондирования Земли, должен освоить специализированное программное обеспечение и владеть навыками практической работы с данными космической съемки. Поэтому в образовательном процессе широко используется оборудование и программное обеспечение Центра космического мониторинга УрФУ, а при изучении указанных дисциплин основной акцент сделан на практическом применении современных специализированных программных комплексов RADARSAT Tools, ERDAS IMAGINE 9.1, SARscape 4.3 для ENVI 4.8, Photomod RADAR, Scanex Image Processor.

Разработанные на кафедре теоретических основ радиотехники УрФУ модульные циклы компьютерных лабораторных работ представляют собой систему учебных заданий для последовательного освоения на практике методов приема, преобразования, интерпретации и применения данных дистанционного зондирования. Модули объединяют работы по видам и уровням обработки

данных дистанционного зондирования Земли. Работы, выбранные из разных модулей, могут составлять лабораторный цикл по той или иной дисциплине.

В наше пособие, кроме краткого теоретического введения по теме практикума, включены лабораторные задания, которые посвящены изучению методов и этапов обработки данных, полученных космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА).

Главный принцип освоения изучаемого материала — применение методов активного обучения, т. е. обучения через практику. В этой связи практикум содержит как поисковые (обучающие методам обработки данных) лабораторные работы, так и лабораторные работы с элементами научных исследований. От обычных лабораторных работ они отличаются тем, что в методических указаниях не содержится подробное (шаг за шагом) изложение того, как надо делать и каковы полученные результаты. Студенту предлагается лишь направление и общая методика исследования, а технологию достижения заданной цели он должен разработать самостоятельно. Задания исследовательского характера приведены в методических указаниях к этим работам.

Предполагается, что при подготовке к лабораторным и практическим занятиям студенты будут использовать совместно с настоящим учебным пособием по лабораторному практикуму учебное пособие [1], а также другие учебники и монографии, на которые ссылаются авторы пособия.

ЭТАПЫ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ. ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ

Прием данных с природно-ресурсных спутников на персональные станции

Система дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) включает в себя:

- носители съемочной аппаратуры: космические аппараты (КА) — искусственные спутники Земли (ИСЗ);
- собственно аппаратуру дистанционного зондирования: сенсоры;
- бортовые средства передачи данных на Землю по радиоканалу;
- наземный сегмент системы: комплексы приема этой информации, ее обработки и предоставления потребителям.

Спутник, перемещаясь по траектории, контролируемой из Центра управления полетами, осуществляет съемку земной поверхности. Когда КА находится в зоне видимости антенной системы пункта приема информации, происходит передача данных ДЗЗ «с борта на Землю» для их дальнейшей обработки. Пункты приема и центры обработки и распространения данных дистанционного зондирования могут быть территориально совмещены. Принятая, распакованная, скорректированная и обработанная информация отправляется в информационно-аналитические центры, которые и передают изображения потребителям.

В последние годы, кроме централизованных пунктов приема спутниковой информации, широкое распространение получают персональные станции. Это позволяет получать информацию

более оперативно, что важно при мониторинге быстроменяющихся объектов на земной поверхности. Сейчас на рынке представлен достаточно широкий диапазон персональных станций приема: УниСкан, MEOS Polar, ПК-9 и др. Станции различаются техническими характеристиками, но строятся по одному принципу. На рис. 1 представлена общая схема станции приема информации со спутника.

Функционально персональная станция приема спутниковой информации состоит из:

- антенной системы;
- одного или нескольких приемников;
- программного обеспечения управления станцией [2].

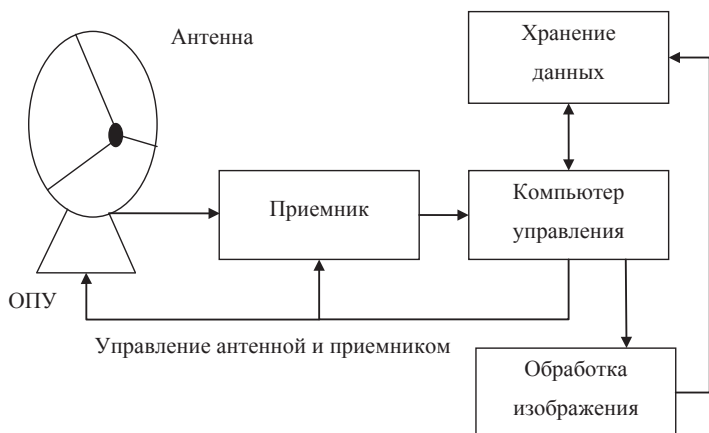


Рис. 1. Функциональная схема станции приема спутниковой информации

Антенная система предназначена для пространственной селекции сигналов, принимаемых с КА ДЗЗ. Для обеспечения устойчивой работы канала связи, по которому передаются эти данные, необходимо осуществлять непрерывное слежение за спутником во время полета. Для этой цели в антенную систему должно входить опорно-поворотное устройство (ОПУ).

В приемном устройстве полученный сигнал проходит через преобразователь частоты, усиливается, демодулируется

и декодируется. Далее цифровой сигнал преобразуется в данные битового формата и заносится в память персонального компьютера, откуда может быть помещен в хранилище. Для принятия информации от нескольких спутников в составе станции может быть несколько приемников или один многоканальный.

В Центре космического мониторинга Института радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ УрФУ размещена персональная станция приема спутниковой информации «УниСкан-24» разработки инженерно-технологического центра «СканЭкс» (Москва). Это многоформатная станция с гибкой аппаратной конфигурацией. Наиболее развитая конфигурация полностью состоит из программируемых компонент, которые теоретически позволяют принимать данные любого формата с несущей частотой в диапазоне 8 ГГц с ограничением только на максимальный темп приема. Технические характеристики станции «УниСкан-24» представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Основные характеристики комплекса «УниСкан-24» [2]

Диаметр антенны, м	2,4
Диапазон частот, МГц	8050–8400
Поляризация	Правая круговая
Диапазон перемещения антенны, град. (°)	
— по оси наклона	± 90
— по азимуту	0–180
Время выхода в заданное угловое положение, с	120
Абсолютная погрешность отработки статического целеуказания по расчетной траектории, угл. мин.	4
Шумовая температура приемника, К	65
Вероятность ошибки восстановления бита при отношении сигнал/шум 14 дБ	10^{-6}
Скорость передачи, Мбит/с	
— при модуляции BPSK	3,75–85
— при модуляции QPSK	7,5–150

Примечание. Станция автоматически переходит в состояние приема при наступлении времени начала витка и прекращает прием по окончании витка или при потере сигнала.

Система гарантирует прием без «мертвой зоны» в зените.

Состав спутников, данные которых может принимать такая станция, определяется ее программным обеспечением (лицензиями на прием информации). Для Центра космического мониторинга УрФУ это четыре спутника оптико-электронной съемки SPOT-4, UK DMC-2, TERRA и AQUA и радиолокационный спутник RADARSAT-1.

Для адаптации приемной станции «УниСкан-24» к новому спутнику и формату не требуется никаких аппаратных модификаций — только дополнительное программное обеспечение при следующих условиях:

- параметры формата лежат в указанных пределах;
- мощность излучения со спутника достаточна для приема на данную антенную систему.

Как отмечалось выше, управление работой станции осуществляется при помощи программного обеспечения. Таким программным продуктом является приложение ScanReceiver для операционной системы MS Windows. Интерфейс приложения представлен на рис. 2 [3].

Основные функции приложения:

- проверка функционирования аппаратной части станции;
- расчет расписания сеансов связи, т. е. прохождения спутников через зону видимости станции;
- автоматическая активизация станции в соответствии с расписанием;
- расчет траектории ИСЗ и управление антенной системой для его сопровождения;
- автоматическая коррекция сопровождения по уровню входного сигнала;
- форматирование демодулированного информационного потока и запись его на жесткий диск;
- непрерывная индикация текущего состояния комплекса и информационного потока (время, объем записанных данных, объем свободного дискового пространства, состояние тактовой и кадровой синхронизации, текущее положение антенны, ошибки сопровождения и т. п.).

Данные, полученные бортовым радиолокатором космической системы ДЗЗ, могут проходить следующие этапы обработки:

- 1) прием необработанных («сырых») данных на наземной станции персонального приема;
- 2) формирование (синтезирование) комплекснозначного радиолокационного изображения (РЛИ);
- 3) устранение геометрических и радиометрических искажений РЛИ;
- 4) фильтрация спекл-шума;
- 5) тематическая обработка амплитудных РЛИ;
- 6) интерферометрическая обработка комплекснозначных РЛИ с целью построения цифровой модели рельефа и определения смещений рельефа.

Изучение этих этапов обработки, за исключением вопросов тематической обработки РЛИ, и составляет содержание приведенных во второй части пособия лабораторных работ.

Формирование космических радиолокационных изображений

В системах ДЗЗ наибольшее применение нашли радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА), работающие в диапазоне длин волн 3–70 см. Вырабатываемые генератором на борту носителя короткие импульсы электромагнитного излучения (радиоимпульсы) усиливаются и излучаются антенной с диаграммой направленности в виде ножевидного луча. Плоскость излучения импульсов перпендикулярна к направлению полета. Местность может облучаться слева и справа от траектории носителя [4, 5].

Геометрия съемки поверхности при боковом обзоре приведена на рис. 3.

КА перемещается по траектории на высоте H с вектором путевой скорости \mathbf{V} . Радиолокационное изображение (РЛИ) местности в полосе обзора ΔR формируется за счет приема сигнала, отраженного от участка поверхности, расположенного в пределах диаграммы направленности реальной антенны (ДНА). Импульс

отражается от подстилающей поверхности в соответствии с диаграммой обратного рассеяния, характерной для каждого типа поверхности. При этом изменяется не только амплитуда импульса, но и начальная фаза его высокочастотного заполнения и поляризация.

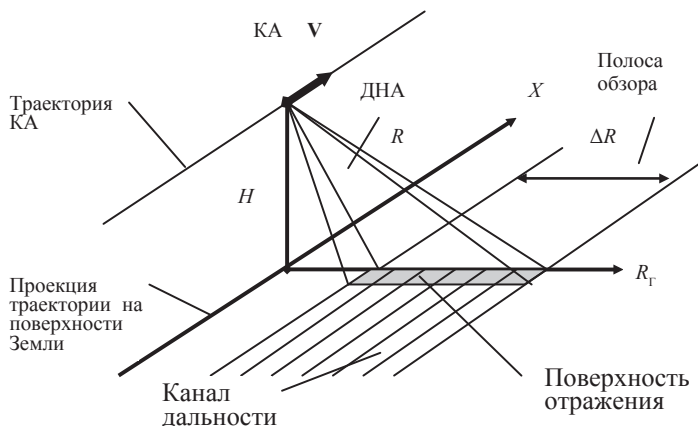


Рис.3. Геометрия съемки поверхности РСА:

КА — положение космического аппарата на траектории, ДНА — диаграмма направленности антенны; V — вектор путевой скорости, X — проекция траектории на поверхность Земли (путевая дальность), $R_Г$ — дальность до отражающего элемента по поверхности Земли, R — наклонная или поперечная дальность, ΔR — полоса обзора; H — высота полета

Таким образом, параметрами, анализируемыми при формировании РЛИ местности, являются: 1) время задержки излученного импульса, 2) амплитуда, 3) фаза, 4) центральная частота, 5) форма частотного спектра, а также 6) поляризация принятого сигнала. Для получения этой информации в состав радиолокационной системы входят устройства, обеспечивающие генерирование электромагнитных колебаний и их излучение, прием и обработку отраженного сигнала, а также регистрацию получаемого РЛИ.

Уровень необработанных, «сырых» или «нефокусированных» данных в системах радиолокационной съемки соответствует преобразованным в цифровую форму сигналам с выхода фазовых детекторов двух квадратурных каналов приемника РСА

(до либо после реализации процедуры сжатия по дальности). В последнем случае массив этих данных называют *цифровой радиоголограммой*.

Обработка траекторных сигналов РСА с целью формирования РЛИ представляет собой процесс двумерной согласованной линейной фильтрации, который в общем случае, описывается сверткой входного сигнала и опорной функции, содержащей фазовый множитель, комплексно сопряженный с фазовым множителем сигнала, отраженного от точечного отражателя.

Комплексная опорная функция $\hat{h}(x, r)$ в координатах: путевая дальность $x = Vt$, наклонная дальность $r = ct/2$ описывается выражением [6]:

$$\hat{h}(x, r) = H_1(x) H_2[r - \hat{R}(-x)] e^{j \frac{4\pi}{\lambda} \hat{R}(-x)} e^{-j\Phi[r - \hat{R}(-x)]}. \quad (1)$$

Здесь $\hat{R}(-x)$ — оценка закона изменения наклонной дальности, $H_1(x)$, $H_2(r)$ — амплитудные весовые функции по путевой и наклонной дальности соответственно.

Обработка сигнала в таком фильтре осуществляется совместно по двум направлениям — вдоль наклонной и путевой дальности, т. е. разбивается на два этапа: внутрипериодный (согласованная фильтрация каждого импульса — «сжатие по дальности») и межпериодный («сжатие по азимуту» — путевой дальности).

Вместе с тем особенностью формирования РЛИ в космических РСА является тот факт, что огибающая отраженного сигнала смещается по дальности за время синтезирования по закону $R_0 - R(x)$. При большом интервале синтезирования сигнал от точечной цели может сместиться настолько, что попадет в соседние, более удаленные элементы разрешения. Этот эффект, называемый эффектом смещения элементов дальности (СЭД), должен учитываться при переходе от внутрипериодной обработки к межпериодной. Функция, описывающая СЭД, содержит в первом приближении две составляющие:

- линейную (миграция дальности);
- квадратичную (искривление дальности).

Линейная составляющая является следствием смещения ДНА от нормали к вектору относительной скорости, возникающего за счет вращения Земли и эллиптичности орбиты. Квадратичная составляющая обусловлена сферичностью фазового фронта отраженной волны и проявляется при большом времени синтезирования.

Закон изменения наклонной дальности, необходимый как для определения фазовой опорной (фокусирующей) функции, так и для компенсации СЭД, может быть выражен через два доплеровских параметра траекторного сигнала — центральную доплеровскую частоту $f_d(0)$ и скорость изменения доплеровской частоты $\dot{f}_d(0)$, измеренные в момент пролета центра интервала синтезирования [6]:

$$R(x) = R(0) - \frac{\lambda}{2} \left[f_a(0) \frac{x}{V} + \frac{1}{2} \dot{f}_a(0) \left(\frac{x}{V} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

Погрешности в определении доплеровских параметров за счет неточного вычисления параметров движения и положения КА, а также его неточная стабилизация приводят к ухудшению качества изображения, выражающемуся в смещении, ухудшении разрешающей способности и снижении динамического диапазона за счет уменьшения уровня главного и роста боковых лепестков синтезированной диаграммы направленности.

Ошибки в определении параметров движения и положения КА обусловлены не только неточностью соответствующих измерителей, но и изменением измеряемого параметра в промежутке между измерениями, поскольку значения параметров движения в систему обработки вводятся дискретно.

Если расчетные значения $f_d(0)$ и $\dot{f}_d(0)$ недостаточно точны для получения изображения высокого качества, используют их адекватную оценку на основании анализа РЛИ или измерения указанных величин доплеровскими методами.

Основная функциональная операция при цифровом формировании изображения в РСА — сжатие по азимуту

(синтезирование апертуры) заключается в реализации в каждом канале дальности корреляционного алгоритма [6]

$$P(m, i) = \left| \sum_{k=m-\frac{N-1}{2}}^{m+\frac{N-1}{2}} \dot{U}[k, i(k)] H_1(m-k) e^{j\frac{4\pi}{\lambda} R(k-m, i)} \right|, \quad (3)$$

где $P(m, i)$ — интенсивность пиксела РЛИ, k, m — номера отсчетов по путевой дальности для сигнала и изображения соответственно, i — номер канала (элемента) наклонной дальности, N — число отсчетов, используемых при синтезировании апертуры, $R(k, i)$ — закон изменения наклонной дальности для i -го канала, $H_1(k)$ — амплитудная весовая функция обработки, регулирующая уровень боковых лепестков в синтезированной диаграмме направленности, в общем случае также зависящая от дальности, $\dot{U}[k, i(k)]$ — отсчеты комплексной огибающей сжатого по дальности сигнала в i -м канале. Зависимость $i(k)$ описывает закон СЭД.

Выражение, стоящее под знаком модуля, описывает комплекснозначное РЛИ (SLC — *Single Look Complex*). Изображения с SLC-уровнем обработки представляется в системе координат снимка, оно довольно сильно деформировано ввиду специфической геометрии съемки и различия разрешающей способности по путевой и наклонной дальностям. Однако изображения этого уровня пригодны для выполнения любого вида последующей обработки данных.

Амплитудное изображение формируется из комплекснозначного РЛИ путем вычисления модуля по синфазной и квадратурной составляющим выходного сигнала. Амплитудное РЛИ также представлено в системе координат снимка, т. е. в наклонной плоскости.

Алгоритм сжатия по азимуту часто реализуется также в частотной области, т. е. строится на фильтрационном принципе. В этом случае дискретная свертка сигнала и фокусирующей функции заменяется перемножением их спектров. При этом последовательно выполняются перевод данных из временной области

в частотную с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ), перемножение спектров сигнала и фокусирующей функции и обратный перевод изображения во временную область представления с помощью обратного БПФ.

Таким образом, процедура формирования радиолокационного изображения (РЛИ) основана на довольно сложных методах цифровой обработки принятого на участке траектории отраженного сигнала, включающих следующие этапы: сжатие по дальности в каждом периоде зондирования; компенсация эффекта смещения элементов дальности (миграции дальности); сжатие по азимуту (путевой дальности) и вычисление модуля по синфазной и квадратурной составляющим выходного сигнала (модуля комплекснозначных данных).

На заключительном этапе может также производиться некогерентное суммирование частных изображений, полученных в нескольких парциальных лучах (*Multi Look*), в целях снижения уровня спекл-шума [5].

Радиометрическая и геометрическая коррекции

Дальнейшая обработка сформированных РЛИ включает процедуры перевода изображения из наклонной плоскости в систему координат «путевая дальность — горизонтальная дальность», нормализации, включающей радиометрическую и геометрическую коррекции, приведения в заданную картографическую проекцию.

Радиометрическая коррекция основывается на использовании уравнения радиолокации и включает:

- устранение искажений интенсивности пиксела за счет изменения коэффициента направленного действия антенны в зависимости от угла наблюдения;

- устранение искажений интенсивности пиксела за счет зависимости уровня принятого сигнала от наклонной дальности (обратно пропорционально R^3);

- нормализацию размера отражающего элемента поверхности в зависимости от углов наблюдения и топографии местности.

Геометрическая коррекция включает операции геокодирования и ортотрансформирования. Геокодирование подразумевает преобразование РЛИ из путевой системы координат (путевая дальность — наклонная дальность) в заданную картографическую проекцию. При этом корректируется различие в величине элемента разрешения в направлении наземной дальности для разных углов скольжения при одинаковой разрешающей способности РСА по наклонной дальности. Геокодирование может выполняться без использования наземных опорных точек, только по орбитальным данным, но, как и для оптических снимков, для достижения высокой точности геопривязки они необходимы. В качестве таких уверенно дешифрируемых объектов целесообразно использовать специальные уголковые отражатели.

Радиолокатор с синтезированной апертурой космического аппарата RADARSAT-1

Космическая программа RADARSAT создана под управлением Канадского космического агентства CSA. Первый спутник данной серии был запущен 4 ноября 1995 года. Параметры его орбиты представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Параметры орбиты спутника RADARSAT-1

Высота орбиты, км	798
Наклонение плоскости орбиты спутника к плоскости экватора Земли, град (°)	98,6
Период обращения, мин	100,7
Пересечение экватора, ч нисходящая орбита восходящая орбита	6 18
Проход над точкой (при съемке в надир), дней	24
Периодичность повторяемости съемки	
в полосе широт 49–70 град.	3 суток
в приполярных районах	ежедневно

Космический аппарат RADARSAT-1 оснащен радиолокатором бокового обзора с синтезированной апертурой. Радиолокатор выполняет съемку поверхности Земли в *C*-диапазоне длин волн (5,6 см), при горизонтальной поляризации излучения.

Радиолокатор бокового обзора космического аппарата RADARSAT-1 позволяет вести съемку в диапазоне углов падения от 10 до 59 градусов справа от линии пути спутника. РЛС может работать в одном из семи основных режимов (рис. 4, табл. 3) [5].

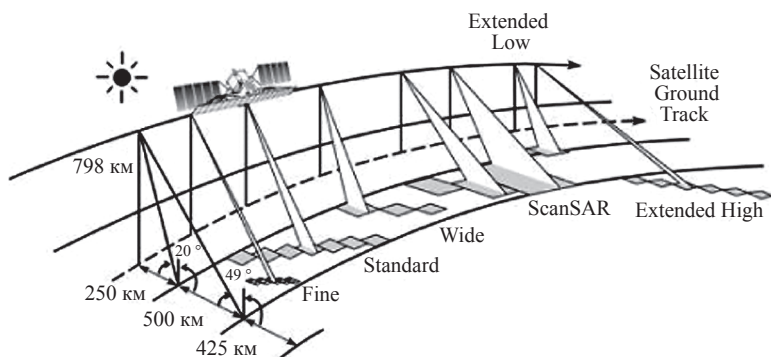


Рис. 4. Режимы работы спутника RADARSAT-1

Режим Standard

Стандартный режим позволяет снимать достаточно широкую полосу поверхности с пространственным разрешением около 25 м. Режим оперирует с одной из семи позиций антенного луча (см. рис. 3). Номинальные углы падения составляют диапазон от 20 (внутренняя граница ближнего луча) до 49 (внешняя граница дальнего луча) градусов. Каждый луч покрывает полосу съемки в 100 км из 500 км, доступных для полного набора лучей.

Режим Wide

Широкий луч схож со стандартным лучом. Отличие заключается в ширине полосы съемки, достигающей 150 км (вместо стандартных 100 км). Антенный луч может занимать одну из трех позиций, что позволяет обеспечить покрытие полосы съемки шириной

почти в 500 км. Разрешение в этом режиме сравнимо с разрешением в стандартном режиме. Третья позиция антенного луча используется, как правило, в режиме формирования изображения ScanSAR и не рекомендована для использования в режиме одиночного луча из-за узкой белой вертикальной черты на изображении.

Т а б л и ц а 3

Характеристики режимов работы РЛС RADARSAT-1

Режим	Ширина полосы обзора, км	Номинальное пространственное разрешение, м	Пределы смещения полосы обзора, км
Детальный (Fine)	50	8	500
Стандартный (Standard)	100	25	500
Широкополосный (Wide)	150	30	500
Расширенный дальний (Extended High)	75	25	425
Расширенный ближний (Extended Low)	170	25	250
Обзорный широкий (ScanSARWide)	500	100	500
Обзорный узкий (ScanSAR Narrow)	300	50	500

Режим Fine

Этот режим предназначается для приложений, требующих лучшее пространственное разрешение от системы RADARSAT. Номинальное разрешение составляет 8,4 м по азимуту и от 7,8 м до 9,1 м по дальности. Так как в этом режиме съемка ведется на более высокой частоте, чем в других режимах, ширина полосы съемки уменьшена и составляет 50 км. Пять позиций луча (см. рис. 3) обеспечивают покрытие дальней части полосы съемки от угла падения в диапазоне 37–47°.

Режим Extended High

Данный режим поддерживает 6 позиций антенного луча. Сбор данных доступен при углах падения 49–60°. Так как этот режим

работы предполагает выход за пределы оптимальной зоны обзора РСА, то ожидаются незначительные искажения в сравнении со стандартным режимом работы. Ширина полосы съемки ограничена до 80 км для трех внутренних позиций и 70 км для трех внешних.

Режим Extended Low

Режим предназначен для съемки с углом падения $10\text{--}23^\circ$ и полосой покрытия в 170 км. Как и в предыдущем режиме, могут присутствовать небольшие искажения, так как съемка ведется за пределами оптимальной зоны обзора.

Режим ScanSAR

В режиме ScanSAR во время съемки используются комбинации двух, трех или четырех лучей. Это позволяет обеспечить более широкую полосу съемки, чем в режиме одиночного луча. Доступны следующие режимы съемки ScanSAR:

1. ScanSAR Narrow обеспечивает ширину полосы съемки 300 км с общим пространственным разрешением 50 м. Возможны две комбинации одиночных лучей. Первая образуется двумя лучами режима и обеспечивает съемку в диапазоне углов $20\text{--}39^\circ$. Во вторую комбинацию входят один луч режима Wide и два луча режима Standard (диапазон углов $31\text{--}46^\circ$).

2. ScanSAR Wide имеет ширину съемки 450–500 км с пространственным разрешением 100 м. Возможны две комбинации одиночных лучей. Первая состоит из трех Wide и одного Standard, вторая — из двух Wide и двух Standard. Первая комбинация покрывает диапазон углов $20\text{--}49^\circ$, вторая — $20\text{--}46^\circ$.

Для обработки данных радиолокатора с синтезированной апертурой космического аппарата RADARSAT-1, принятых станцией УниСкан, разработан пакет программ RADARSAT Tools [7]. Пакет преобразует данные, поступающие с борта космического аппарата, в цифровую радиоголограмму — стандартный продукт «Radarsat CEOS Level 0» и стандартные географически привязанные продукты уровня 1 (синтезированное изображение) — «Radarsat CEOS Level 1». При переходе от данных уровня SLC

к этому уровню может также осуществляться усреднение значений отсчетов РЛИ по дальности и азимуту, чтобы приблизительно привести размеры пиксела к квадрату.

Фильтрация спекл-шума

Одной из особенностей изображений, получаемых космическими РСА, является неравномерность фона, обусловленная когерентным спекл-шумом. Первопричиной пятнистости изображения однородной поверхности (участки изображений, занятых лесной растительностью, сельскохозяйственными угодьями, лугами) является когерентное сложение откликов от большого количества элементарных отражателей, находящихся в пределах одного поверхностного элемента разрешения, и изменение их состава при переходе от одного элемента к другому. Спекл-структура может использоваться для идентификации пространственно-распределенных объектов и оценивания некоторых характеристик РСА, однако в подавляющем большинстве случаев спекл-шум является нежелательным фактором и затрудняет дешифрирование РЛИ (может привести к ложному обнаружению точечных целей или к пропуску слабоконтрастных объектов).

Статистическая модель классического спекла базируется на представлении элемента разрешения РСА в виде совокупности большого числа случайных независимых элементарных точечных отражателей с приблизительно одинаковыми рассеивающими свойствами и равномерно распределенными фазами отражений [4]. Предположив, что аддитивные шумы относительно невелики (обычно менее -15 дБ), внутриимпульсная модуляция зондирующего сигнала отсутствует, диаграмма направленности антенны состоит только из одного лепестка и имеет постоянный коэффициент усиления в пределах этого лепестка, а отсчеты РЛИ в азимутальном направлении следуют через расстояние, равное элементу разрешения, можно записать выражение для отсчетов комплексного РЛИ

$$\dot{U}(x, y) = \dot{S}(x, y) \cdot n(x, y), \quad (4)$$

где $\hat{S}(x, y)$ — комплексная функция радиолокационного рельефа [4] с учетом средней интенсивности отражений от зондируемого участка поверхности, а $n(x, y)$ — однородное гауссово случайное поле с единичной дисперсией, независимое от элемента разрешения к элементу разрешения, описывающее пятнистость (спекл-шум).

В этом случае амплитуда отсчетов РЛИ распределена по релевскому закону, а фаза равномерна на интервале от $-\pi$ до π .

Существующие в настоящее время методы сглаживания спекл-шума можно разделить на следующие группы:

- 1) суммирование независимых РЛИ;
- 2) глобальные алгоритмы (алгоритмы винеровской и калмановской фильтрации, алгоритмы, использующие гомоморфное преобразование РЛИ, геометрическая фильтрация);
- 3) локальные алгоритмы.

При уже существующем радиолокационном изображении наиболее часто на практике используются алгоритмы последней группы. Отличительной особенностью данной группы алгоритмов обработки РЛИ является тот факт, что непосредственная обработка ведется в «скользящем окне», размеры которого невелики по сравнению со всем изображением. Поэтому преимуществом локальных методов сглаживания является более высокая вычислительная эффективность по сравнению с глобальными методами, а также возможность организации обработки РЛИ в реальном масштабе времени за счет упрощения процедур сглаживания и распараллеливания процесса обработки.

Данную группу образуют следующие алгоритмы: усреднение в скользящем окне, медианная фильтрация, подгруппа адаптивных алгоритмов, а также различные их модификации.

Усредняющие фильтры

Эти фильтры строятся на основе среднего значения амплитуды отсчетов локальной области изображения, окружающей центральный отсчет U_{ij} . Если m — размер стороны локальной области,

в пределах которой осуществляется формирование оценки $\hat{S}_k(i, j)$ k -го вида, то для усредняющего фильтра

$$\hat{S}_{ij} = \sum_{k=i-m/2}^{i+m/2} \sum_{l=j-m/2}^{j+m/2} U_{kl}, \quad (5)$$

Модификации усредняющего фильтра строятся на основе разбиения анализируемого фрагмента РЛИ на области меньшего размера с вычислением оценки \hat{S} по наиболее однородному (в смысле минимальной дисперсии) из них, а также путем предварительного логарифмирования поля РЛИ с последующим суммированием отсчетов и придания различного веса отсчетам, расположенным в разных областях окна обработки.

Медианный фильтр

Представляет собой скользящее окно, охватывающее нечетное число элементов изображения. Центральный элемент заменяется медианой всех элементов изображения в окне:

$$\hat{S}_{ij} = m \underset{i \pm m, j \pm m}{\text{e d}} \{U_{kl}\}. \quad (6)$$

Медианой дискретной последовательности из $m \cdot m$ элементов является элемент, для которого существуют $(m \cdot m - 1)/2$ элементов, меньших или равных ему по величине, и $(m \cdot m - 1)/2$ элементов, больших или равных ему по величине.

Адаптивные процедуры

Несколько проигрывая указанным выше в быстродействии, эти процедуры обладают неоспоримым преимуществом перед ними: они точнее отслеживают все изменения яркости радиолокационного изображения. Это связано с тем, что параметры алгоритмов меняются в зависимости от статистических характеристик фрагмента РЛИ, ограниченного текущим положением «окна» обработки. При этом допускается, что статистика блока представляется собой статистику выборки элемента изображения в центре

этого блока. Для точной оценки истинного значения такого элемента необходимо, чтобы размер блока был достаточно большим. Однако неоднородность поверхности и дополнительные вычислительные затраты существенно ограничивают размер окна обработки, что, в свою очередь, приводит к ошибке в оценке параметров процедуры фильтрации, а следовательно, к потере четкости на изображении, ограничивая тем самым возможности данной группы алгоритмов. Тем не менее применение адаптивных алгоритмов для сглаживания спекл-шума считается сегодня наиболее предпочтительным.

К числу наиболее распространенных адаптивных алгоритмов относятся следующие:

- фильтрация методом локальных статистик (методом Ли):

$$\hat{S}_{ij} = \bar{U} + \frac{\sigma_U^2}{\bar{U}^2 \sigma_n^2 + \sigma_s^2} (U_{ij} - \bar{U}), \quad (7)$$

где $\sigma_s^2 = \frac{\sigma_U^2 + \bar{U}^2}{\sigma_n^2 + 1} - \bar{U}^2$ дисперсия неискаженного шумами изображения в «окне» обработки, \bar{U} среднее значение яркости РЛИ в «окне» обработки, σ_U^2 дисперсия яркости в окне обработки и σ_n^2 дисперсия спекл-шума, которую необходимо определить по фрагменту изображения однородного участка поверхности в соответствии с выражением $\sigma_n^2 = \sigma_U^2 / \bar{U}^2$ либо рассчитать заранее с учетом всех параметров РЛС;

- сигма-фильтрация:

$$\hat{S}_{ij} = \sum_{k=i-m_1}^{i+m_1} \sum_{l=j-m_2}^{j+m_2} \delta_{kl} U_{kl} / \sum_{k=i-m_1}^{i+m_1} \sum_{l=j-m_2}^{j+m_2} \delta_{kl}, \quad (8)$$

где δ_{kl} равняется 1, если $(1 - Z\sigma_n)U_{ij} \leq U_{kl} \leq (1 + Z\sigma_n)U_{ij}$, и 0 в остальных случаях;

- локальная адаптивная фильтрация:

$$\hat{S}_{ij} = \bar{U} + 0,5 (1 - \bar{U}^2 / \sigma_U^2) (U_{ij} - \bar{U}). \quad (9)$$

Более подробно ознакомиться с алгоритмами фильтрации спекл-шума можно в монографии [8] и учебно-методическом пособии [9].

Применение интерферометрической радиолокационной съемки для построения цифровых моделей рельефа

Основные функции и принципы работы интерферометрического радиолокатора

Интерферометрический радиолокатор с синтезированной апертурой (интерферометрический РСА, ИРСА) — это радиолокационная система, позволяющая синтезировать цифровые трехмерные изображения земной поверхности с помощью фазовых измерений. Интерферометрические радиолокаторы по способу аппаратной реализации можно разделить на два класса: 1) ИРСА с реальной базой и 2) ИРСА с синтезированной базой. Первый класс устройств — это РСА с двумя или более антеннами, изготовленные специально для выполнения такой съемки; второй класс — это обычные РСА, в которых база образуется при движении носителя по параллельной орбите. Происхождение терминов «реальная база» и «синтезированная база» абсолютно аналогично происхождению терминов «реальная апертура» и «синтезированная апертура».

По функциональному назначению ИРСА можно разделить на обычные и специальные. Обычные ИРСА используются для построения трехмерных цифровых моделей рельефа и местности (ЦМР и ЦММ). Специальные ИРСА — это либо обычные ИРСА в дополнительных режимах съемки (дифференциально-интерферометрические РСА), либо комбинации ИРСА с другими типами радиолокационных систем: с поляризационной обработкой (поляриметрические ИРСА) и с инверсной (инверсные ИРСА).

Существуют следующие типы «обычных» интерферометрических PCA:

- **п о п е р е ч н ы й ИРСА** (*across-track InSAR*) — PCA с двумя антеннами, смещенными в вертикальной плоскости. Это классическая интерферометрическая система с реальной базой, которая позволяет получать трехмерное изображение местности по данным одной съемки. Пример такой системы — спутниковый ИРСА SIR-C;

- **п р о д о л ь н ы й ИРСА** (*along-track InSAR*) — PCA с двумя антеннами (т. е. с реальной базой), смещенными вдоль линии пути, предназначенный для измерения быстрых подвижек поверхности (например, скоростей морских течений) и являющийся по сути дифференциально-интерферометрическим PCA (см. ниже), однако в литературе его традиционно относят к «обычным» ИРСА;

- **ИРСА с повторным проходом** (*repeat-track InSAR*) — это PCA с одной антенной и с синтезированной базой; этот тип интерферометрической съемки на сегодня самый распространенный, поскольку он реализован обычными PCA ERS, JERS, RADARSAT, ENVISAT, ALOS, TerraSAR.

Рассмотрим принципы работы ИРСА на примере двухпроходной системы. Съемка производится с двух параллельных орбит, кратчайшее расстояние между двумя орбитами называется интерферометрической базой, или просто базой (*baseline*). Разность расстояний между точками съемки и точкой на земле определяется по разности фаз принятых сигналов. При вычитании фаз в значительной мере компенсируются случайные сдвиги и набеги фазы, вызываемые различными явлениями (случайный сдвиг при отражении, сдвиги в атмосфере, аппаратуре и т. д.). Зная параметры орбит съемочных систем, а также имея данные об опорной поверхности, можно вычислить высоту относительно опорной поверхности для каждой точки получаемой пары снимков. Параметры орбиты обычно входят в комплект поставки снимка; опорная поверхность может представлять собой опорный эллипсоид (референц-эллипсоид) со справочными параметрами

или же их можно извлечь из цифровой модели рельефа низкого разрешения.

Последовательность обработки радиолокационной информации с целью получения модели рельефа показана на рис. 5.

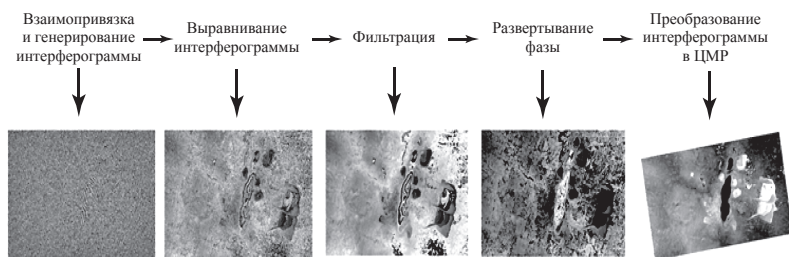
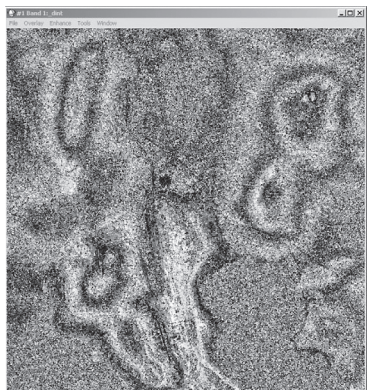


Рис. 5. Цепочка интерферометрической обработки данных РСА

Сначала корреляционным способом производится взаимопривязка изображений (амплитудная корегистрация), затем изображения комплексно перемножаются (т. е. первое умножается на комплексно-сопряженное второе), результатом чего становится фазовая интерферограмма — картина из интерференционных полос (*fringes*), форма которых зависит от рельефа местности. Далее производится выравнивание интерферограммы (*flattening*): из каждого отсчета (пиксела) изображения вычитается расчетное значение набега фазы от опорной поверхности, в результате чего количество интерференционных полос заметно уменьшается. Затем производится фильтрация полученной интерферограммы и построение для нее изображения коэффициента когерентности, который представляет собой отношение между когерентной и некогерентной суммами отсчетов первого и второго изображения. Участки, где коэффициент когерентности меньше заданного порога (обычно 0,25), в дальнейшем исключаются из построения ЦМР. На следующем этапе происходит развертывание фазы, т. е. устранение скачков фазы на 2π (рис. 6.) Существует около десятка алгоритмов осуществления операции развертывания фазы, и каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками.



1



2

Рис. 6. Интерферограмма до (1)
и после (2) развертывания фазы

Последним этапом интерферометрической обработки является преобразование интерферограммы в цифровую модель рельефа — геопривязка. Этот этап выполняется оператором вручную и заключается в выборе опорных точек, устанавливающих соответствие между полученной моделью с системой географических координат. С одной стороны, опорные точки должны хорошо опознаваться на радиолокационном изображении, с другой — их географические координаты (в том числе и высота) должны быть известны с высокой точностью. В результате выполнения данного этапа формируется цифровая модель рельефа в географической системе координат (рис. 7), а также пара радиолокационных изображений, привязанных к этой же системе координат.

Все шаги интерферометрической обработки данных реализуются с помощью специализированных пакетов обработки радиолокационной информации, таких как SARscape фирмы SARMAP, IMAGINE Radar Mapping Suite фирмы Leica Geosystems и Photomod Radar фирмы «Ракурс». Эти пакеты во многом эквивалентны и отличаются в основном наличием дополнительных возможностей вроде стереоскопической или поляриметрической обработки.

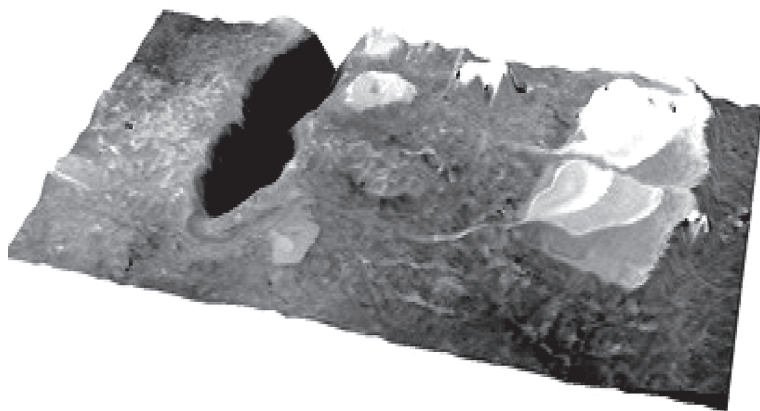


Рис. 7. Цифровая модель рельефа, полученная методом космической радиолокационной интерферометрии

Значительный прогресс в сфере интерферометрической радиолокации произошел в 1990-е гг., с появлением на орбитах постоянно действующих спутников ДЗЗ с PCA на борту — ERS-1 и ERS-2, JERS и RADARSAT. Тогда же стали явно заметны проблемы, характерные для двухпроходной интерферометрической съемки, — декорреляция данных и атмосферные фазовые задержки. Данные ИРСА с успехом применяются в различных областях, связанных с картографией и мониторингом природных ресурсов и территорий. Основная область применения данных ИРСА — это топографическое картографирование, т. е. создание карт местности, содержащих высотную информацию (горизонтالي). В разных источниках приводятся зависимости вертикальной точности измерения высот от погрешностей определения различных параметров (эфемерид, длины базы, параметров зондирующего сигнала), однако проблемой остается исследование зависимости точности от факторов негеометрического характера — параметров атмосферы и отражающих свойств поверхности. Дифференциальная интерферометрия используется для обнаружения подвижек грунта, вызываемых антропогенными воздействиями (например, при разработке

месторождений полезных ископаемых открытым и закрытым способами). Также она применяется при оценке последствий землетрясений и, возможно, их прогнозирования.

Технология построения цифровых моделей рельефа по данным космической радиолокационной интерферометрической съемки исследуется в лабораторной работе 4 (с. 56–59).

Фильтрация фазового шума и развертывание интерферометрической фазы при обработке данных

Точность цифровой модели рельефа, получаемой при радиолокационной интерферометрической съемке, может существенно зависеть от выбора применяемых процедур фильтрации фазового шума и развертывания интерферометрической фазы.

Поскольку топографическая фаза имеет, как правило, большой интервал корреляции, то для подавления слабокоррелированного фазового шума можно применять обычные алгоритмы низкочастотной фильтрации, например усреднение в локальном окне (отдельно по действительной и мнимой компонентам). Однако эффективность обычного усреднения в немалой мере зависит от средней когерентности на участке интерферограммы (чем она ниже, тем больше элементов следует брать для усреднения), поэтому предпочтительнее использовать адаптивные фильтры. Обычно используемый при интерферометрической обработке пространственный адаптивный фильтр строится следующим образом. Формируется предустановленный набор оценочных локальных окон масочного типа разных размеров (например, 3×3 и 9×9). Окна строятся так, что значения маскируемых элементов соответствуют определенным углам поворота прямой. Далее производится локальное развертывание фазы в окнах обоих размеров, после чего для каждого из 16 больших окон вычисляется среднее квадратичное отклонение, после чего отбирается окно с наименьшим отклонением (и соответствующее ему окно малых размеров). После отбора нужных окон вычисляется оценка сигнала для центрального элемента окон, для чего используется следующая статистика: $\hat{z} = c_1 z_1 + c_2 z_2 + c_3 z_3$,

где $c_1 = \gamma^2$, $c_2 = 2\gamma(1-\gamma)$, $c_3 = (1-\gamma)^2$ — коэффициенты, γ — локальный коэффициент когерентности [5, 10], z_1, z_2, z_3 — статистики, вычисляемые в выбранных окнах: первая статистика вычисляется в окне размером 3×3 (по элементам, находящимся под маской), вторая — в окне 9×9 (также — по элементам в маске), третья — в результате двукратной фильтрации в окне 9×9 . Статистика \hat{z} построена так, чтобы при высокой когерентности приоритет имела оценка в малом окне, а при низкой — в большом. Возможны и другие варианты формирования оценки центрального элемента, кроме того, существует разновидность фильтра, работающего с комплексными значениями интерферограммы.

Среди фильтров, работающих в частотной области, наибольшее распространение при интерферометрической обработке получил фильтр Гольдштейна. Принцип его действия достаточно прост. После вычисления БПФ комплексной интерферограммы в локальном окне полученный двумерный спектр $F(i, j)$ преобразуется следующим образом:

$$G(i, j) = |F(i, j)|^{1-\gamma} \cdot F(i, j), \quad (10)$$

где γ — оценка локального коэффициента когерентности. Для областей с низкой когерентностью коэффициент γ близок к нулю, и они подвергаются наиболее интенсивной фильтрации; для областей же высокой когерентностью $\gamma \approx 1$ фильтрация практически отсутствует.

Значительно более сложной, нежели фильтрация интерферометрического шума, является задача развертывания интерферометрической фазы. Исторически первый алгоритм двумерного развертывания фазы — алгоритм вставки ветвей отсечения, или алгоритм Гольдштейна (*Goldstein residue-cut algorithm*) [11]), — основан на поиске точек и областей интерферограммы, где нарушается условие потенциальности градиента фазы, и исключении их из процесса интегрирования. Согласно этому условию интеграл по любому замкнутому контуру в поле градиента фазы должен быть равен нулю. Как правило, рассматриваются контуры минимально возможного радиуса, включающие четыре соседних

элемента. Точки, в которых ротор градиента отличен от нуля, называют фазовыми вычетами, или фазовыми остатками; они могут быть положительными и отрицательными. Пара из близлежащих отрицательного и положительного вычетов соединяется ветвью, совокупность ветвей образует дерево. Далее различными методами оптимизации строится дерево наименьших размеров, после чего производится интегрирование изображения градиента фазы, причем пути интегрирования должны обрываться в местах пересечения с ветвями.

Алгоритм Гольдштейна является частным случаем алгоритма минимальной стоимости потоков (MCF), основанного на решении оптимизационной задачи минимизации разделенной целевой функции вида

$$\sum_i \sum_j g_{i,j} (\text{grad } \varphi_{i,j} - \text{grad } \psi_{i,j}) \rightarrow \min, \quad (11)$$

где $\psi_{i,j}$ — абсолютная фаза (исходно неизвестна); $g_{i,j}(\dots)$ — функция, включающая весовые коэффициенты и правила вычисления нормы L . Этот метод развертывания относится к глобальным.

Метод растущих регионов (*region growing*) — один из локальных алгоритмов развертывания. Он основан на линейном предсказании значения абсолютной фазы элемента интерферограммы $\hat{\psi}_{i,j}$ на основании развернутых ранее значений:

$$\hat{\psi}_{i,j} = \frac{\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N w_{m,n} \psi_{i-m, j-n}}{\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N w_{m,n}}, \quad (12)$$

где $\psi_{i-m, j-n}$ — набор значений развернутых ранее абсолютных фаз; $w_{m,n}$ — весовые коэффициенты; M, N — полуразмеры локального окна. Наиболее часто используемыми на практике являются окна размером 5×5 элементов, для которых $M = N = 2$. Весовые коэффициенты выбираются исходя из взаимного расположения

развернутых и неразвернутых элементов интерферограммы по следующему правилу: на тех направлениях, где к развертываемому на данном шаге элементу прилегают два ранее развернутых элемента $\psi_{i-m, j-n}$, ближайший из них берется с коэффициентом 2, следующий — с коэффициентом 1, если же на выделенном направлении лежит только один ранее развернутый элемент, то он берется с весом 1. Исходных точек для развертывания может быть несколько, выбираются они на участках с высокой когерентностью.

Исследование эффективности работы различных алгоритмов фильтрации фазового шума и развертывания интерферометрической фазы является на сегодня важной научной и технической задачей. Элементы подобного исследования проводятся в лабораторной работе 5. Более подробно ознакомиться с алгоритмами фильтрации фазового шума и развертывания фазы можно в публикациях [11, 12].

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

1. Прием данных ДЗЗ на наземной станции «УниСкан-24»

Цель работы

Изучение технологии приема данных с природноресурсных спутников на персональные станции приема серии «УниСкан».

Домашнее задание

1. Изучите характеристики и возможности приемной станции «УниСкан-24».
2. Рассчитайте периодичность спектрозональной съемки районов Свердловской области с космических аппаратов Terra, Aqua, Spot-4.
3. Рассчитайте периодичность радиолокационной съемки объектов на территории Свердловской области с КА RADARSAT-1 в обзорном (Standart) и детальном (Fine) режимах.
4. Оцените объемы данных, поступающих в одном сеансе съемки с вышеуказанных КА.

Задания для исследований в лаборатории

1. Изучите технологию планирования съемки.
2. Изучите работу с программными средствами управления станцией «УниСкан-24» (приложение ScanReceiver).
3. Ознакомьтесь с форматами записи и хранения данных ДЗЗ с космических аппаратов (КА) Terra, Aqua, Spot-4, RADARSAT-1.

Методические рекомендации

Основная практическая часть лабораторной работы состоит в изучении работы программного приложения управления приемом ScanReceiver.

1. Изучите пользовательский (графический) интерфейс приложения ScanReceiver и назначение его элементов.

2. Изучите расписание прохождения спутников и расписание сбросов (обратить внимание на орбитальные элементы, по которым производится расчет расписания и траектории спутника).

3. Ознакомьтесь с индикацией текущего состояния станции во время сеанса приема.

4. Ознакомьтесь с особенностями форматов приема и хранения данных, поступающих с различных спутников.

В процессе изучения необходимо зафиксировать следующие экранные формы в процессе приема данных:

- главное окно;
- расписание приема;
- редактор трасс КА Terra, Aqua, Spot-4, RADARSAT-1;
- индикация приема;
- ход приема данных КА Terra (MODIS).

Содержание отчета

1. Цель лабораторного занятия.

2. Результаты домашней подготовки:

- состав и взаимодействие аппаратного комплекса «УниСкан-24»;
- состав и назначение программных средств приемного комплекса;
- технические характеристики наземной станции приема «УниСкан-24»;
- расчет периодичности съемки г. Екатеринбурга КА Spot-4, Terra, Aqua, RADARSAT-1 (в обзорном и детальном режимах);
- расчет объема принимаемых данных.

3. Результаты исследований в лаборатории:

- состав и назначение элементов главного окна приложения ScanReceiver,
- экранные формы, иллюстрирующие основные этапы работы станции,
- основные характеристики форматов данных КА Terra, Aqua, Spot-4, RADARSAT -1.

4. Выводы. Результаты реализации целей и задач лабораторной работы.

Контрольные вопросы и задания

1. Каково назначение наземной станции приема «УниСкан-24»?
2. Что такое «поток сырых данных»?
3. Перечислите основные этапы обработки данных ДЗЗ.
4. Какие уровни обработки данных включает этап предварительной обработки?
5. Чем определяется периодичность съемки заданного района?
6. Назовите характеристики данных оптико-электронной съемки с КА Terra, Aqua (сенсор MODIS): высоту орбиты, периодичность, полосу обзора, спектральный диапазон, количество каналов, пространственное разрешение.
7. Назовите характеристики данных оптико-электронной съемки с КА Spot-4: высоту орбиты, периодичность, полосу обзора, спектральный диапазон, количество каналов, пространственное разрешение.
8. Назовите характеристики данных радиолокационной съемки с КА RADARSAT-1: высоту орбиты, периодичность, длину волны, полосу обзора, режимы съемки, пространственное разрешение.

2. Синтез фрагмента радиолокационного изображения по данным PCA RADARSAT-1

Цель работы

Изучение методов формирования космического радиолокационного изображения на примере обработки данных RADARSAT-1, принятых станцией «УниСкан-24».

Домашнее задание

1. Изучите характеристики, режимы работы и уровни обработки данных радиолокатора КА RADARSAT-1.
2. Изучите этапы и алгоритмы формирования РЛИ в детальном и стандартном режимах.
3. Ознакомьтесь с особенностями работы программного комплекса RADARSAT Tools.

Задание для исследований в лаборатории

1. Произведите синтез радиолокационного изображения RADARSAT-1 средствами программного комплекса RADARSAT Tools.
2. Оцените плановую (горизонтальную) погрешность его автоматической привязки.

Методические рекомендации

Исходные данные: файл формата RAD, содержащий необработанные данные, полученные во время сеанса приема при работе бортового радиолокатора космического аппарата RADARSAT-1 в одном из штатных режимов (Fine, Standard), файл орбиты ORB, файл описания диаграммы направленности антенны PAP, таблица калибровки яркостей LUT.

Используемое программное обеспечение: программный комплекс RADARSAT Tools (модули SAR Converter и SAR Processor), программный пакет ScanMagic (либо ScanEx Image Processor, либо ENVI 4.8).

1. Запустите RADARSAT Tools SAR Converter Shell, в форме указать в качестве исходного файла: RAD_82063_110725134109_F2.RAD, в качестве выходного пути — подпапку L0 рабочей папки (рабочая папка указывается преподавателем, подпапка L0 должна быть создана предварительно!), в поле ProductID — первые 8 букв латинизированного варианта собственной фамилии. Поле Clock Rollover устанавливается равным 4, если съемка была произведена после 22 сентября 2011 г., или 3 — для съемок, произведенных в период с мая 2006 г. по 21 сентября 2011 г. В качестве исходного времени (start time) установите 2011-07-25 13-43-41.13, в качестве конечного End time — такое время, чтобы кадр получился примерно квадратным (ширина полосы съёмки — 70 км, скорость космического аппарата — около 7,5 км/с). Запустите процесс обработки (см. окна настройки на рис. 1–3).

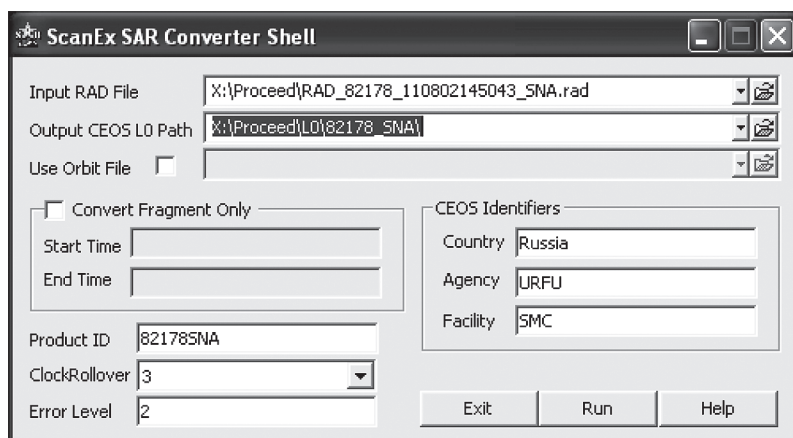


Рис. 1. Окно настройки программного модуля ScanEx SAR Converter

2. После успешного окончания формирования данных уровня L0 запустите RADARSAT Tools SAR Processor Shell. В поле Data File укажите путь к полученному на предыдущем этапе файлу dat_01.001 (остальные 3 поля этого раздела заполняются автоматически), в качестве пути для результирующих файлов укажите

подпапку L1 рабочей папки, предварительно ее создав. В поле Use Orbit File указывается путь к файлу, соответствующему орбите снимка (номер орбиты определяется по имени исходного файла RAD). Параметр Doppler Ambiguity устанавливается в значение Automatic Estimation, Reference Height — 0 m (см. первую строку таблицы «Параметры синтезирования»). Запустите процесс обработки.

Параметры синтезирования

№ п/п	Doppler Ambiguity	Reference Height, m
1	Default	0
2	Default	100
3	Default	250
4	+1	250
5	-1	250
6	+2	0
7	Default	500

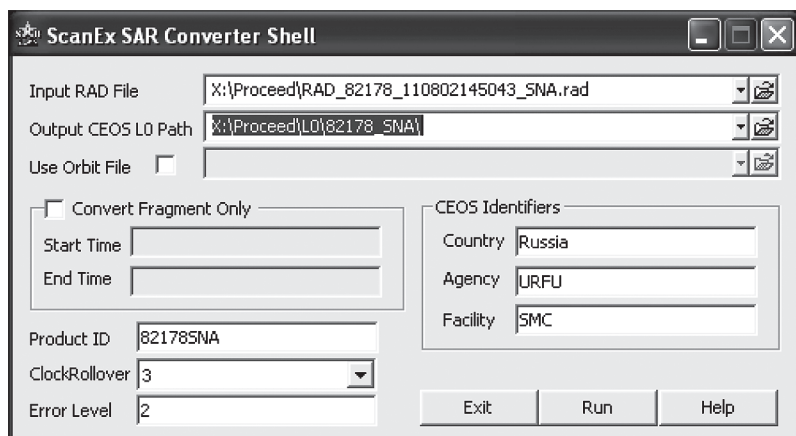


Рис. 2. Основное окна настройки параметров синтезирования апертуры

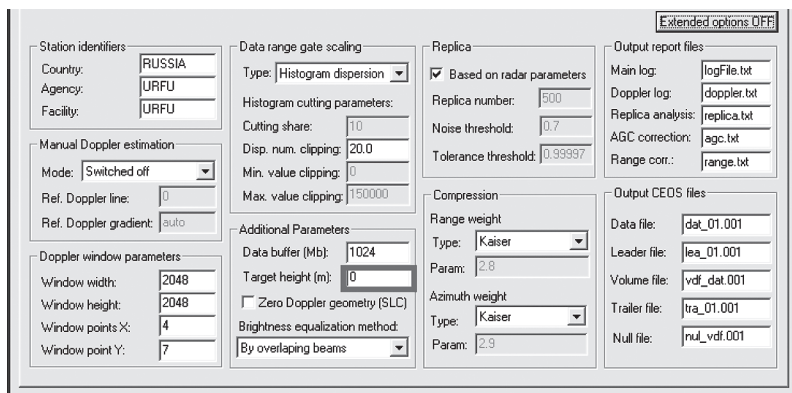


Рис. 3. Окно расширенных настроек синтезирования

3. Откройте сформированное на предыдущем этапе изображение (формата CEOS L1) в одном из пакетов по обработке данных ДЗЗ, проведите геокоррекцию (в пакетах ScanEx Image Processor и ScanMagic она производится автоматически при открытии данных), наложите на изображение векторную карту из набора ESRI World Maps (слои рек и озер). С помощью измерительных средств используемого пакета оцените 3 расхождения между снимком и картой: в азимутальном направлении, в дальностном направлении, общее. Сделайте вывод о причине расхождений, указав доминирующий фактор (рис. 4, 5).

4. Проведите повторные синтезы изображения в пакете RADARSAT Tools SAR Processor с параметрами, указанными в таблице. Для каждого случая оцените расхождения с картой. Укажите наиболее удачный случай.

Содержание отчета

1. Цель работы
2. Описание лабораторного задания и хода работы с указанием пакета ПО, использовавшегося при работе
3. Сводная таблица эксперимента, включающая параметры синтезирования и соответствующие им показатели расхождений

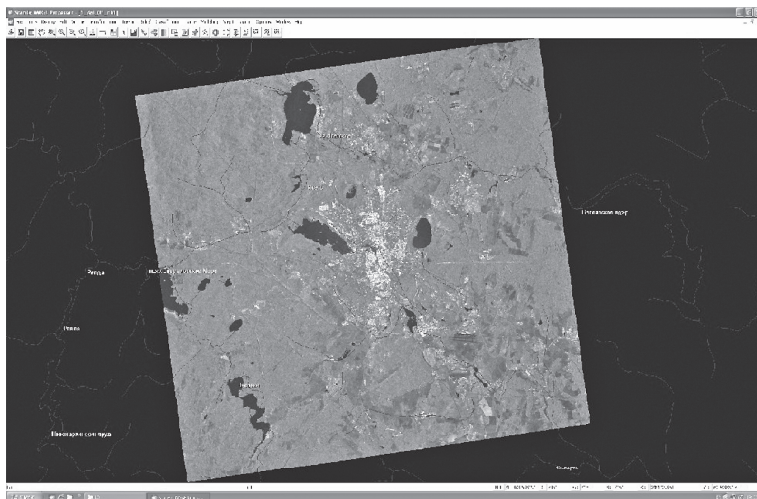


Рис. 4. Окно изображения с наложением карты

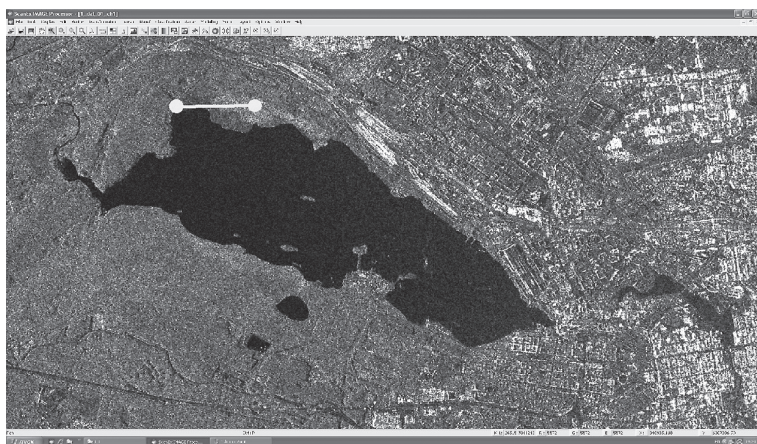


Рис. 5. Определение погрешности привязки

4. Копии экранов (без элементов интерфейсов программного пакета и операционной системы) с полученными изображениями и наложенными на них векторными картами для каждого случая

5. Выводы, в которых указывается причина появления расхождений и вариант набора параметров с наименьшим расхождением.

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите режимы работы радиолокатора КА RADARSAT-1 и характеристики получаемых РЛИ.

2. Перечислите этапы обработки и алгоритмы формирования РЛИ КА RADARSAT-1, указав, какие модули программного комплекса RADARSAT Tools используются для их осуществления.

3. Как оценивается плановая (горизонтальная) погрешность местоположения РЛИ на местности? Какими путями эту погрешность можно уменьшить?

4. Из-за чего возникает неоднозначность определения центральной доплеровской частоты? Как она связана с географической широтой места съемки?

5. В каком направлении смещаются отметки от движущихся целей на радиолокационном изображении?

6. Оцените длину радиолокационного изображения RADARSAT-1 (в километрах) при условии, что съемка ведется непрерывно в пределах видимости приемной станции, сигнал космического аппарата доступен при углах места выше 5 градусов. (Землю считать шарообразной.)

3. Фильтрация спекл-шума на изображениях PCA

Цель работы

Исследование локальных алгоритмов подавления спекл-шума на изображениях PCA на основе программного модуля ERDAS IMAGE 9.1.

Домашнее задание


1. Изучите теоретический материал, посвященный фильтрации спекл-шума на изображениях PCA. Обратите внимание на локальные алгоритмы фильтрации.

2. Ознакомьтесь с методикой выполнения лабораторной работы в программном модуле ERDAS Image 9.1.

Задание для исследований в лаборатории

Исследуйте качество обработки изображения 6.img фильтрами, заложенными в ППП ERDAS Image. Для этого:

1. Обработайте изображение 6.img усредняющим (Mean) фильтром при размере скользящего окна 3×3 , 5×5 , 7×7 . Полученный результат сравните с исходным изображением.

Примечание: Качество обработки изображения оценить с помощью инструмента Start Profile Tools ( — кнопка на панели инструментов окна ERDAS Image).

2. Обработайте изображение 6.img медианным (Median) фильтром:

- при размере скользящего окна 3×3 , 5×5 , 7×7 сравните полученные результаты;
- при размере скользящего окна 5×5 , используя два (три) его прохода, сравните полученные результаты;
- сравните способы 1 и 2, сделайте выводы о качестве обработки изображения медианным фильтром.

3. Обработайте изображение 6.img σ -фильтром (Lee-Sigma). Для этого множитель коэффициента вариации установите равным

0,5 (1, 2), а размер скользящего окна (3×3 , 5×5 , 7×7) соответственно. Проведите преобразование. Полученные данные сведите в таблицу.

4. Обработайте изображение 6.img фильтрами Ли (Lee) и Фроста (Frost) при размере скользящего окна 3×3 , 5×5 , 7×7 . Сравнить полученные результаты.

5. Обработайте изображение 6.img локальным адаптивным фильтром (Local Region). Примите размер скользящего окна равным 3×3 , 5×5 , 7×7 .

6. Снимите график зависимости коэффициента ковариации изображения lake.img:

- от количества итераций ($n = 4$) при размере скользящего окна 3×3 ;
- от размера скользящего окна (3×3 , 5×5 , 7×7).

Изображение обработайте поочередно усредняющим, медианным фильтрами, σ -фильтром, фильтрами Ли и Фроста, локально-адаптивным фильтром для каждого пункта.

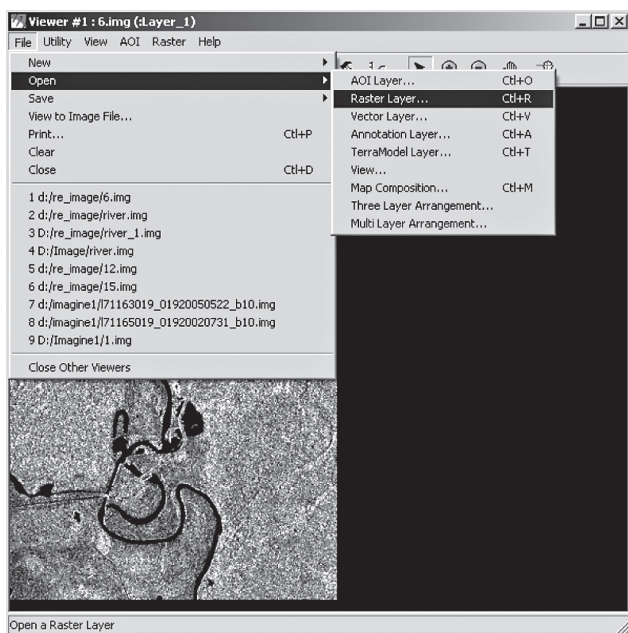
7. Сделайте выводы о проделанной работе.

Методические рекомендации

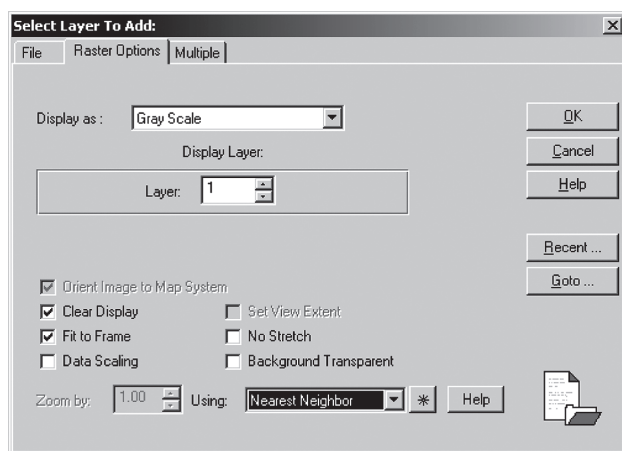
1. Загрузка изображения в окно ERDAS Image

Для выполнения лабораторной работы запустите программу ERDAS IMAGINE 9.1. Откройте два окна (но учтите, что одно отрывается при запуске программы). В одно из окон загрузите изображение 6.img (рис. 1, а):

После этого откроется окно Select Layer To Add (Выберите изображение) на вкладке File выберите необходимое вам изображение, затем, не закрывая окно, откройте вкладку Raster Options (Настройки растра) и включите флажки Fit to Frame (Вписать изображение в окно) и Clear Display (Очистить окно перед загрузкой). Загруженные в окна изображения автоматически будут отображены с растяжкой гистограммы в два стандартных отклонения (см. рис. 1, б). Нажмите ОК.



a



б

Рис. 1. Загрузка изображения 6.img в окно ERDAS Imagine (а),
окно Select Layer To Add (б)

В меню ERDAS IMAGINE 9.1. выберите Session|Tile Viewers (Расположить окна мозаикой). Это поможет вам сравнить профильтрованное изображение с оригиналом, а после решить, нужно ли еще раз проводить изображение чрез фильтр, чтобы, наконец, получить желаемый результат.

Чтобы запустить инструмент Speckle Suppression (Подавление спекл-шумов), нужно на главной панели IMAGINE выбрать Radar| Radar Interpreter| Speckle Suppression. В результате откроется окно Radar Speckle Suppression (рис. 2) содержащее следующие параметры:

- кнопка — обработать ту часть изображения, которая находится в рамке запросов;
- Coordinate Type — тип, координат, используемых для определения подмножества. Если в обрабатываемом изображении не содержится информации о карте, то подходящим вариантом следует выбрать File;
- Subset Definition — определяет область изображения для предварительного использования или импортирования;
- Input (Output) File — входной (выходной) файл;
- Moving Window — скользящее окно (вводить следует только нечетные цифры);
- Data Type — тип данных;
- Filter — тип используемого фильтра;
- Coef. of Variation — коэффициент вариации;
- выберите опцию ☐ Calculate Coefficient of Variation, чтобы посчитать коэффициент вариации изображения;
- ☐ Ignore Zero in Stats. — игнорируйте нулевые значения при вычислении статистических данных.

Коэффициент вариации случайной величины — мера относительного разброса случайной величины; показывает, какую долю среднего значения этой величины составляет ее средний разброс. Равен отношению стандартного отклонения к математическому ожиданию. В отличие от среднего квадратического (стандартного отклонения), измеряет не абсолютную, а относительную меру разброса значений признака

Спекл-шум на радиолокационных изображениях математически может быть смоделирован как мультипликативный шум с математическим ожиданием, равным 1. Поэтому коэффициент вариации в данном случае равен стандартному отклонению изображения.

Для этого на главной панели IMAGINE выберите Radar| Radar Interpreter| Speckle Suppression. Откроется окно Radar Speckle Suppression (Подавление спекл-шумов на радиолокационном изображении) (рис. 2).



2. Фильтрация изображения усредняющим фильтром

При обработке изображения усредняющим (Mean) фильтром выполните следующие действия (рис. 3):

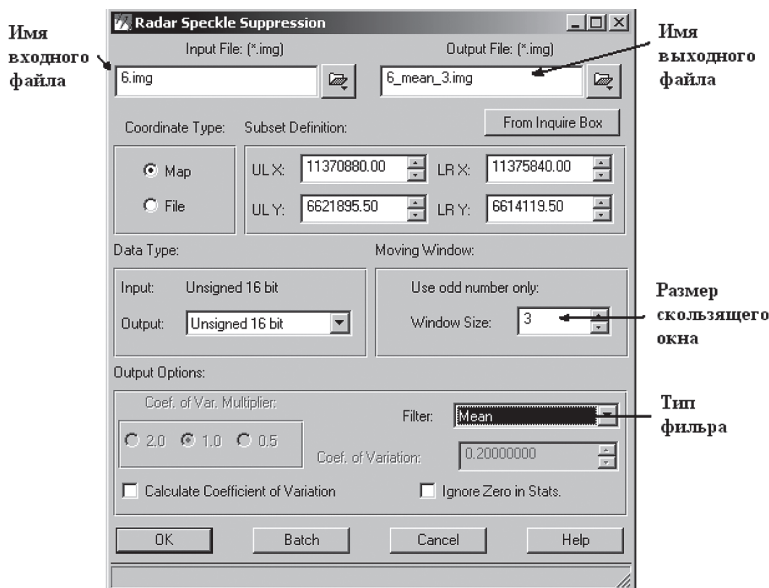


Рис. 3. Установка опций для обработки изображения усредняющим фильтром

а) загрузите изображение, которое будет подвергнуто фильтрации усредняющим фильтром, в качестве входного файла (Input File);

б) определите директорию, в которой у вас будет находиться выходной файл (Output File);

в) выберите фильтр (Mean), размер скользящего окна установите 3×3 . Нажмите ОК, появится окно выполнения фильтрации (рис. 4);

г) выполните предыдущие три операции (а–в) для выходного файла;

д) оцените полученные результаты с помощью инструмента Start Profile Tools.

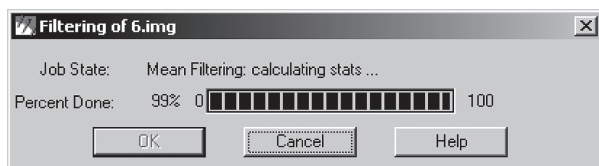
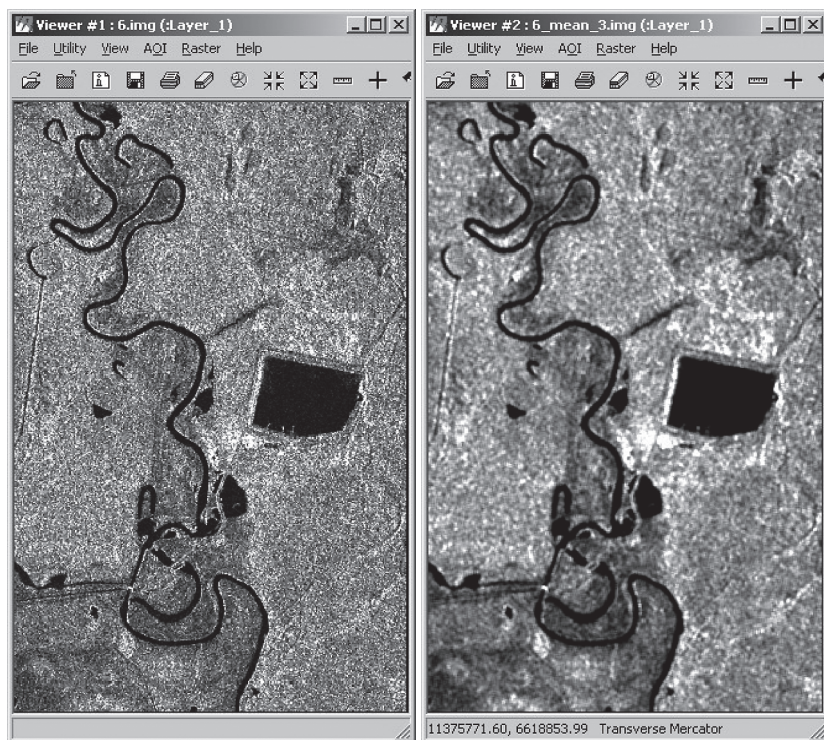


Рис.4. Окно выполнения фильтрации изображения

На обработанном изображении (рис. 5, б) заметно снизилась пятнистость, что свидетельствует об уменьшении спекл-шума, но при этом наблюдается размытость пикселей как проявление недостатка любой из типов фильтрации.




a

б

Рис. 5. Фильтрация изображений усредняющим фильтром:

a — исходное изображение; *б* — обработанное изображение

Инструмент Start Profile Tools вызывается нажатием кнопки . Полученные результаты обработки фильтром можно сравнить с исходным изображением в двумерном (Spatial) и трехмерном (Surface) пространстве. Профиль пространства задается в окне, приведенном на рис. 6. Пример применения данного инструмента непосредственно к изображению приведен на рис. 7.

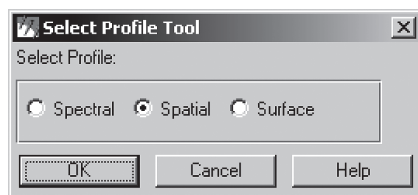


Рис. 6. Окно выбора профиля пространства

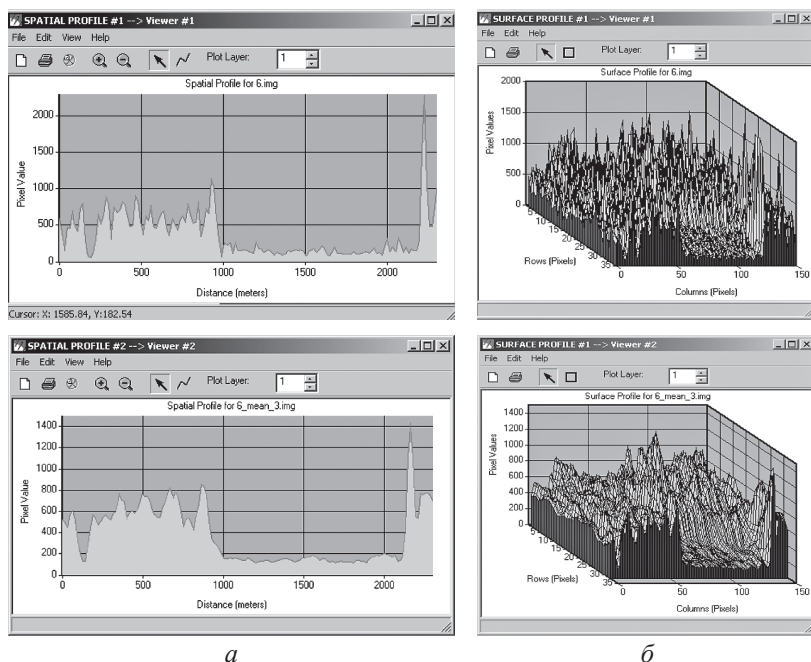


Рис. 7. Пример использования усредняющего фильтра:

a — использование профиля Spatial (пространственный);
б — использование профиля Surface (объемный)

Следующие процедуры фильтраций выполняйте, устанавливая необходимые опции в окне Radar Speckle Suppression и следуя методическим указаниям, описанным ниже.

3. Фильтрация изображения медианным фильтром

Обрабатывать изображение медианным фильтром можно до тех пор, пока процесс фильтрации начинает приносить больше вреда, чем пользы:

- а) выполните пункты *а* и *б* предыдущей процедуры фильтрации;
- б) выберите тип фильтрации Median (медианная), размер локального окна обработки выберите 3×3 , нажмите ОК;
- в) сравните обработанное изображение с оригиналом;
- г) если необходимо, выполните фильтрацию снова, выбрав входным файлом только что профильтрованное вами изображение, а размер скользящего окна установите 5×5 .
- д) продолжайте до тех пор, пока не будут заметны ухудшения, т. е. каждый раз сравнивайте входное изображение с выходным, при этом входным файлом всегда выступает выходной файл предыдущей фильтрации, а размер скользящего окна увеличивается по мере роста номера фильтрации, опишите ваши действия в отчете;
- е) повторите пункты *а–д* для другого изображения, но в данном случае размер скользящего окна оставляйте всегда одним и тем же;
- ж) сравните два способа;
- з) ответьте на вопрос, чем отличается медианная фильтрация от фильтрации усредняющим фильтром.

4. Фильтрация изображения σ -фильтром

При обработке изображения σ -фильтром (Lee-Sigma) выполните следующие действия:

- а) загрузите изображение, которое будет подвергнуто фильтрации σ -фильтром в качестве входного файла;
- б) определите директорию, в которой у вас будет находиться выходной файл (Output File);
- в) установите Coef. of Var. Multiplier (Множитель коэффициента вариации) равным 0,5, а размер скользящего окна 3×3 , выберите фильтр (в данном случае Lee-Sigma); введите значение

коэффициента вариации, вычисленного вами в первом задании; нажмите ОК.

г) вычислите коэффициент вариации выходного изображения, который потребуется для следующего этапа фильтрации;

д) выполните пункты а, б, но входным файлом загрузите изображение, бывшее выходным в предыдущей операции; установите необходимое значение коэффициента вариации (см. п. д).

е) установите Coef. of Var. Multiplier (Множитель коэффициента вариации) равным 1, а размер скользящего окна 5×5 , произведите фильтрацию;

ж) выполните пункты з–е для только что обработанного изображения;

з) установите Coef. of Var. Multiplier (Множитель коэффициента вариации) равным 2, а размер скользящего окна 7×7 , произведите фильтрацию;

и) данные сведите в табл 1:

Т а б л и ц а 1

№ п/п	Имя входного файла	Имя выходного файла	Коэффициент вариации	Множитель коэффициента вариации	Размер скользящего окна

к) сравните полученные изображения, а именно водную поверхность, постройки, открыв одновременно сразу же несколько выюеров;

л) выполните подобную σ -фильтрацию для второго изображения.

5. Фильтрация изображения фильтрами Ли и Фроста

Выполните фильтрацию изображения 6.img фильтрами Ли (Lee) и Фроста (Frost), указав при этом значение коэффициента вариации, вычисленное вами выше. Выполните фильтрацию дважды: первый раз с размерами скользящего окна второй раз — с размерами 5×5 . При этом входным файлом всегда будет оригинал. Сравните полученные результаты.

Обработайте изображение 6.img локальным адаптивным фильтром (Local Region). Примите размер скользящего окна равным 3×3 , 5×5 .

6. Построение графика зависимости коэффициента ковариации от количества проведенных итераций (размера скользящего окна)

Посчитайте коэффициент ковариации изображения lake.img при $n = 4$ (n — количество итераций). Но для выполнения данного задания необходимо выполнить фильтрацию изображения lake.img 4 раза при размере скользящего окна 3×3 (в этом случае в качестве входного файла в каждой новой итерации будет служить выходной файл только что выполненной вами итерации). Вычислите коэффициент ковариации для усредняющего, медианного, локально-адаптивного фильтров, σ -фильтра, фильтра Ли и фильтра Фроста (рис. 8).

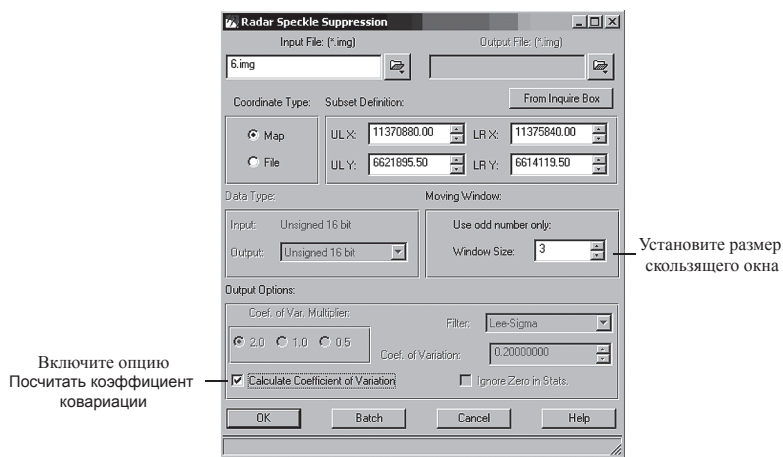


Рис. 8. Включение опций для расчета коэффициента вариации

Посчитайте коэффициент ковариации для изображения lake.img при размерах скользящего окна 3×3 , 5×5 , 7×7 .

В открытом окне Radar Speckle Suppression выберите функцию Calculate Coefficient of Variation (Посчитать коэффициент ковариации). Все другие опции окна будут отключены, кроме

Subset Definition (определяющий тип входных данных: карта (Map) или файл (File)) и размер скользящего окна (Moving Window). Нажмите OK.

Окно Radar Speckle Suppression будет закрыто, но появится окно Coefficient of Variation (Расчет коэффициента вариации), показывающее прогресс выполнения функции (рис. 9).

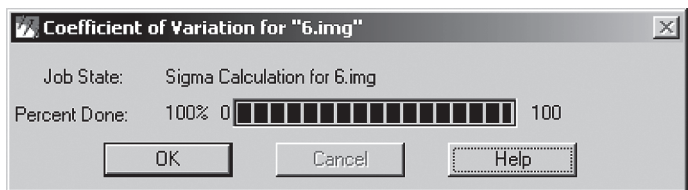


Рис. 9. Окно выполнения работы функции

Когда это окно отобразит, что работа выполнена на 100 %, нажмите OK, если окно не закроется автоматически. Для того, чтобы узнать посчитанный коэффициент вариации, откройте окно Session Log (Журнал), пример окна приведен на рис. 10, для этого в главном меню IMAGINE выберите Session| Session Log.

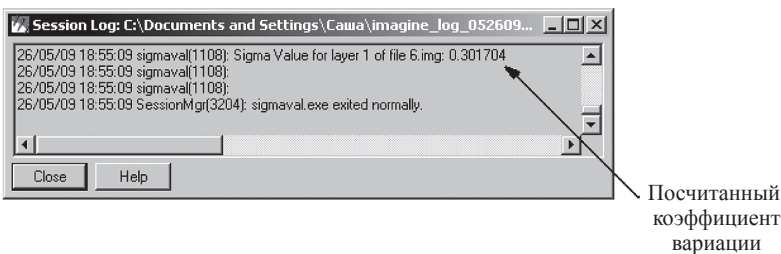


Рис.10. Окно Session Log

Полученные данные сведите в табл. 2 и постройте график зависимости коэффициента вариации от размера скользящего окна. Сделайте соответствующие выводы.

Т а б л и ц а 2

№ п/п	Размер скользящего окна	Значение коэффициента вариации

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Скриншоты с исходным изображением и результатами его обработки.
3. Таблица с результатами практической части.
4. Графики зависимости уровня спекл-шума от алгоритма фильтрации и размеров окна обработки.
5. Выводы по работе и рекомендации по использованию алгоритмов фильтрации и выбору их параметров.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое спекл и почему он присутствует на изображениях РСА?
2. За счет чего происходит сглаживание спекл-шума при суммировании независимых радиолокационных изображений?
3. Каким образом можно получить независимые радиолокационные изображения?
4. Как осуществляется локальная фильтрация в режиме «скользящего окна»?
5. Какова основная особенность, присущая всем адаптивным алгоритмам фильтрации?
6. Опишите работу медианного фильтра.
7. Как можно оценить спекл-шум на изображении?

4. Построение цифровой модели рельефа по данным космической радиолокационной интерферометрической съемки

Цель работы

Освоение технологии построения цифровой модели рельефа по интерферометрической паре радиолокационных изображений радиолокатора RADARSAT-1.

Домашнее задание

1. Изучите теоретический материал, посвященный интерферометрической обработке данных космических РСА.
2. Ознакомьтесь с методикой выполнения интерферометрической обработки радиолокационных данных в программном комплексе SARscape.

Задание для исследований в лаборатории

1. С помощью программного пакета SARscape 4.3 и программного комплекса ENVI 4.8 изучите исходные данные — фрагменты радиолокационных изображений КА RADARSAT-1 в формате Single-Look Complex (SLC): `_rli1` и `_rli2`.
2. Для фрагментов `_rli1` и `_rli2`. произведите корегистрацию, постройте и отобразите интерферограмму. Для построенной интерферограммы произведите коррекцию фазового набег, вызванную геометрией земного эллипсоида.
3. Произведите фильтрацию фазового шума интерферограммы. Тип используемого фильтра задается преподавателем. Отобразите интерферограмму после фильтрации, охарактеризуйте произошедшие изменения.
4. Отобразите карту когерентности, полученную при выполнении предыдущего этапа. По двум-трем однородным участкам с различной когерентностью постройте гистограммы распределений модуля коэффициента когерентности, сделайте вывод о характере его закона распределения. По виду закона распределения

оцените, какой процент элементов интерферограммы имеет значения ниже 0,25.

5. Произведите развертывание фазы интерферограммы с использованием алгоритма, заданного преподавателем. Визуально оцените полученный результат, убедитесь в отсутствии (или наличии) артефактов развертывания.

6. Произведите привязку полученной интерферограммы к системе координат эталона. Штатными средствами комплекса ENVI определите среднеквадратичное отклонение полученной цифровой модели рельефа.

7. Повторите этапы 1–6, указав другие параметры накопления на первом этапе: 2×1 и 4×2 . При этом на пятом и шестом этапах используются те же опорные точки, но с коррекцией пиксельных координат, выполняемой путем деления исходного значения (использовавшегося при накоплении 1×1) на число накоплений в данном направлении. Также произведите обработку, поменяв местами *Master*- и *Slave*-изображения при накоплении 2×1 .

Методические рекомендации

1. Исходными данными для выполнения работы являются: 2 файла радиолокационных изображений формата SLC (файлы *rli1* и *rli2*), карта местности в условной системе координат и высот, эталонная цифровая модель рельефа. Для обработки используется программный пакет SARscape 4.3 под оболочкой программного комплекса ENVI 4.8.

2. Корегистрация и построение интерферограммы в SARscape производится с помощью функции *Interferogram generation (without DEM)*. Для нее требуется указать исходные данные: изображения *_rli1* (его указать в качестве основного — *Master*) и *_rli2* (*Slave*). Результат следует сохранить в рабочую папку (указывается преподавателем), имя которой должно соответствовать латинизированной фамилии студента. В качестве параметров некогерентного накопления (*Azimuth Looks* и *Range Looks*) оба раза следует указать единицу. Интерферограмма сохраняется в файл без расширения и с окончанием *_int*, параллельно создается еще ряд файлов

(заголовочные файлы, файлы метаданных и пр.), которые понадобятся при выполнении последующих этапов.

3. Коррекция фазового набега от земного эллипсоида производится с помощью функции *Interferogram Flattening (DEM/Ellipsoid)*. Внешнюю цифровую модель рельефа указывать не нужно. Результат процедуры сохраняется в файл с окончанием *_dint*. Параллельно создается файл типа *_sint*, содержащий набег фазы, вызываемый геометрией земного эллипсоида и представляющий собой разность между фазами *_int* и *_dint* (с точностью до постоянного слагаемого, кратного 2π).

4. Фильтрация фазового шума интерферограммы производится с помощью функции *Adaptive Filter and Coherence Generation*. Предусмотрено 3 типа фильтров (*Adaptive*, *Boxcar* и *Goldstein*). Результат сохраняется в файл с окончанием *_fint*. Одновременно с процедурой фильтрации автоматически строится карта когерентности (модуля когерентности), которая сохраняется в файл с окончанием *_ss*.

5. Развертывание фазы производится с помощью функции *Phase Unwrapping*. Более предпочтительным является метод *Region Growing* (по крайней мере — для версий *SARscape* до 3.2 включительно). Результат развертывания сохраняется в файл с окончанием *_urha*.

6. Привязка интерферограммы в географическую систему координат (в том числе в систему координат эталона) является самым трудоемким этапом интерферометрической обработки, к тому же не поддающимся автоматизации. В пакете *SARscape* на первом шаге этого этапа производится набор опорных точек путем визуального сопоставления карты местности и исходного радиолокационного изображения с помощью функции *Generate Ground Control Points File* (при наборе точек используется *Master*-изображение). Обычно достаточно расставить 7 опорных точек в пределах области, покрываемой интерферограммой. Функцией *Phase to Height Conversion and Geocoding* можно произвести преобразование интерферограммы в матрицу высот (цифровую модель рельефа) и ее геокодирование, однако предварительно следует

произвести коррекцию орбиты интерферограммы с помощью функции Orbit Refinement and Re-flattening, которая не создает новых файлов, а только корректирует файлы привязки.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Описание исходных данных, лабораторного задания и хода работы.
3. Сводная таблица эксперимента, включающая полученные значения среднеквадратичных отклонений от эталона и параметры эксперимента.
4. Копии получившихся изображений интерферограмм на различных этапах обработки и карта когерентности для случая с параметрами накопления 4×2 .
5. Выводы о влиянии количества некогерентных накоплений и замены *Master*- и *Slave*-изображений на среднеквадратичное отклонение модели и визуальное восприятие модели и интерферограммы.

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите этапы интерферометрической обработки радиолокационных данных. Какие из них не являются обязательными?
2. Какие ограничения накладываются на длину интерферометрической базы?
3. Какими основными факторами определяется точность цифровых моделей рельефа, получаемых при радиолокационной интерферометрической съемке?
4. Возможна ли интерферометрическая съемка в оптическом диапазоне длин волн?

5. Сравнение эффективности алгоритмов фильтрации фазового шума при интерферометрической обработке радиолокационных данных

Цель работы

Исследование влияния типа и параметров алгоритма фильтрации фазового шума на точность цифровой модели рельефа, получаемой методом космической радиолокационной интерферометрии.

Домашнее задание

1. Изучите особенности работы алгоритмов фильтрации фазового шума *Adaptive Window* и *Goldstein*, а также алгоритма развертывания интерферометрической фазы *Region Growing*.

2. Разработайте алгоритм оценки точности цифровой модели рельефа, получаемой с помощью радиолокационной интерферометрической съемки.

Задание для исследований в лаборатории

1. Произведите интерферометрическую обработку фрагментов радиолокационных изображений *gsp1* и *gsp2*, используя для фильтрации фазового шума следующие фильтры:

- адаптивный фильтр *Adaptive Window* при следующих параметрах: размер окна 5×5 , коэффициент сходства 1,2 (или другие по указанию преподавателя);
- фильтр *Boxcar Window* (окно когерентности 5×5 , интерферометрическое окно 4×4 , порог по отношению сигнал/шум 0,05 или другие по указанию преподавателя);
- фильтр *Goldstein* (параметр по умолчанию или другие по указанию преподавателя).

Примечание. Развертывание интерферометрической фазы во всех случаях произвести методом *Region Growing*.

2. Произведите интерферометрическую обработку тех же фрагментов, используя для фильтрации фазового шума фильтр *Goldstein*, а для развертывания фазы — метод MCF.

3. Произведите интерферометрическую обработку тех же фрагментов, но после выравнивания интерферограммы сразу же проведите развертывание фазы методом *Region Growing*, а затем — фильтрацию фазового шума методом *Goldstein*.

4. Все интерферограммы абсолютной фазы, полученные на этапах 1–3, привяжите к системе координат эталонной модели. Средствами ENVI постройте карты разностей между каждой из полученных моделей и эталонной моделью рельефа и произведите оценку среднеквадратичного отклонения построенных моделей от эталонной.

Методические рекомендации

1. Исходными данными для выполнения работы являются фрагменты радиолокационных изображений *rsp1* и *rsp2*, эталонная цифровая модель рельефа *etal_dem* и файл опорных точек *ground.xml*. Для обработки используйте программный пакет SARscape 4.3 под оболочкой программного комплекса ENVI 4.8.

2. Привязку интерферограммы абсолютной фазы к системе координат эталонной модели рельефа произведите с помощью файла опорных точек *ground.xml* и функции *Phase to Height Conversion* and *Geocoding*.

3. Постройте карту разностей между полученной цифровой и эталонной моделью рельефа, а также произведите оценку среднеквадратичного отклонения с помощью функций пакета ENVI *Band Math* и *Compute Statistics*. Поскольку функция *Band Math* позволяет работать только с данными одинакового размера, то перед вычислениями следует произвести вырезку фрагментов модели и эталона в одинаковых границах, захватывающих большую часть исследуемых данных.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Описание исходных данных, лабораторного задания и хода работы.
3. Копии карт разностей между полученными моделями рельефа и эталоном для всех исследованных случаев.

4. Сводная таблица эксперимента, включающая названия алгоритмов, их параметры и полученные значения среднеквадратичных отклонений.

5. Выводы об эффективности фильтров и о возможности перестановки местами операций фильтрации фазового шума и развертывания фазы.

Контрольные вопросы и задания

1. Объясните принципы работы алгоритмов фильтрации фазового шума *Adaptive Window* и *Goldstein*.

2. Объясните принципы работы алгоритма развертывания интерферометрической фазы *Region Growing*.

3. Объяснить, почему задача развертывания интерферометрической фазы не имеет однозначного решения. Приведите примеры фазовых картин, которые не могут быть развернуты однозначно.

4. Чем определяется уровень фазового шума на участке интерферограммы?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Обработка данных дистанционного зондирования Земли: практические аспекты : учеб. пособие / В. Г. Коберниченко, О. Ю. Иванов, С. М. Зраенко и др. ; под общ. ред. В. Г. Коберниченко. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. 168 с.
2. УниСкан. Станция для приема данных со спутников ДЗЗ в диапазоне 8 ГГц. Описание и основные характеристики. М. : ИТЦ СканЭкс, 2010.
3. Scan Receiver. Приложение управления станцией УниСкан : версия 6.54 и руководство пользователя. М. : ИТЦ СканЭкс, 2010.
4. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрование радиолокационных изображений / Л. А. Школьный и др. ; под. ред. Л. А. Школьного. М. : Изд-во ВВИА, 2008. 531 с.
5. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Вербя, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук ; под ред. В. С. Вербя. М. : Радиотехника, 2010. 680 с.
6. Коберниченко В. Г. Особенности формирования изображений в космических радиолокаторах с синтезированной апертурой // Вестн. УГТУ–УПИ. Теория и практика радиолокации земной поверхности. Сер. радиотехн. Екатеринбург, 2005. № 19(71). С. 43–50.
7. RADARSAT Tools : описание пакета программ. М. : ИТЦ СканЭкс, 2010.
8. Рис У. Г. Основы дистанционного зондирования. М. : Техносфера, 2006. 336 с.
9. Иванов О. Ю. Фильтрация спекл-шума на изображениях РСА : метод. указания к лаборатор. работе по курсу «Принципы построения и обработка информации в радиоэлектронных системах дистанционного мониторинга» / УГТУ–УПИ. Екатеринбург, 2005 22 с.
10. Hanssen R. F. Radar Interferometry. Kluwer Academic Publishers, 2002.
11. Коберниченко В. Г., Сосновский А. В. Анализ алгоритмов интерферометрической обработки данных космической радиолокационной съемки // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2010. Т. 13, № 3. С. 98–106.
12. Сосновский А. В., Коберниченко В. Г. Исследование алгоритмов развертывания фазы при формировании цифровых моделей местности методом космической радиолокационной интерферометрии // Изв. вузов России. [Сер.] Радиоэлектроника. Спец. вып. СПб. : СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2012. С. 84–93.

Учебное издание

Коберниченко Виктор Григорьевич

Иванов Олег Юрьевич

Сосновский Андрей Васильевич

ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Лабораторный практикум

Заведующий редакцией *М. А. Овечкина*

Редактор *Р. Н. Кислых*

Корректор *Р. Н. Кислых*

Компьютерная верстка *Н. Ю. Михайлов*

План выпуска 2013 г. Подписано в печать 05.09.2013.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times.

Уч.-изд. л. 3,5. Усл. печ. л. 3,7. Тираж 100 экз. Заказ № 2077.

Издательство Уральского университета
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4

Тел.: +7 (343) 350-56-64, 350-90-13

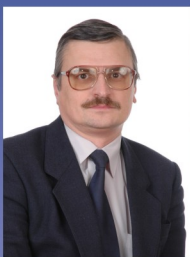
Факс: +7 (343) 358-93-06

E-mail: press-urfu@mail.ru



КОБЕРНИЧЕНКО ВИКТОР ГРИГОРЬЕВИЧ

Кандидат технических наук (1974), доцент (1981), профессор кафедры теоретических основ радиотехники, научный руководитель Центра космического мониторинга. Автор более 200 научных работ. Лауреат премии Правительства РФ в области образования. Сфера научных интересов – радиолокационные системы с синтезированной апертурой, цифровая обработка информации в радиоэлектронных системах космического дистанционного зондирования Земли, применение информационных технологий в сфере природной и техногенной безопасности.



ИВАНОВ ОЛЕГ ЮРЬЕВИЧ

Кандидат технических наук (2007), доцент (2010), директор Центра космического мониторинга. Автор более 100 научных и учебно-методических работ. Сфера научных интересов – обработка информации в радиоэлектронных системах дистанционного зондирования Земли.



СОСНОВСКИЙ АНДРЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

Выпускник радиотехнического факультета Уральского государственного технического университета – УПИ по специальности «Радиоэлектронные системы» (2006). Старший преподаватель кафедры теоретических основ радиотехники. Автор 10 научных работ. Сфера научных интересов – обработка сигналов и изображений в системах дистанционного зондирования Земли.